

茨城大学工学部

○ 古米 弘明

ノースウエスタン大学

B.E. Rittmann

1. はじめに

Rittmann & Brunner¹⁾ は、非定常な生物膜モデルを用いた生物膜の成長と消失の予測と、低濃度の有機基質を供給する生物ろ過実験を行い、生物膜の基質除去特性を検討した。実験では、数十日以上にわたって微量の基質しか流入させない条件でも、生物膜が消失せず、基質除去活性が引き続き保持される結果を得ている。しかし、彼等のモデル計算では増殖より死滅や剥離が卓越して生物膜の消失が起り、生物膜の基質除去活性は急激に低下するという予測となり、従来型の生物膜モデル²⁾ の概念では不十分であることを報告している。そして、その理由として、硝化菌自身が従属栄養菌の基質になっていることや、従属栄養菌の基質への親和性が増大した可能性を指摘した。そこで、本研究では、まず硝化菌からの有機物供給の可能性を検討するために、展開済みの微生物代謝産物を考慮した生物膜モデル^{3) 4)} を適用して、混合培養系の生物膜における硝化菌由来の微生物代謝産物 (SMP) の影響を定量的に検討することを目的とした。

2. 簡易生物膜モデルの特徴

図-1 に示すように、本モデルでは微生物分布を層状に仮想した生物膜を考え、増殖速度の大きき順に表層から従属栄養菌、硝化菌、不活性バイオマスの層を想定した。各層ごとに代表濃度を与え、その濃度勾配を各層厚を用いて表現している。詳しい物質収支式や速度式は、既報^{4) 5)} に記載している。重要な点は、生物膜の特徴である物質輸送抵抗と生物膜分布を巧みにモデルに組み込みながら、溶解性微生物代謝産物 (SMP) の動力学も考慮していることである (参照図-2)。したがって、硝化菌と従属栄養菌とのSMPのやり取りを考えながら、生物膜の基質除去特性の非定常過程を評価可能である。なお、生物膜の剥離は、Rittmann⁶⁾ を参考にして全生物膜に対して一律な剥離速度定数を実験条件から計算して与えた。

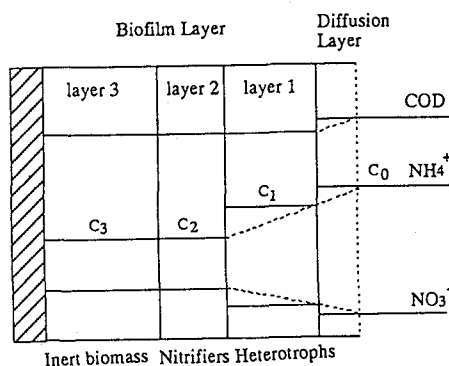


図-1 生物膜モデルの概念図

3. 実験結果とモデルでの予測

3.1 低濃度基質流入条件での生物膜実験の概要

表-1 に、Rittmann & Brunner¹⁾ の行ったカラムによる生物膜の実験条件をまとめて示した。実験は3つの期間に区分されている。流入有機物 (ガラクトース) 濃度を、3.2 (Phase I) から 0.32 (Phase II)、0.032 mg/l (Phase III) へと段階的に低下させている。これは、定常状態で増殖量と消失量 (死滅を含む) がバランスする基質濃度²⁾ S_{min} より低い流入濃度を与えて、生物膜が減少、消失するように設定した。Phase IIIでは、流入基質 (有機物) 濃度を一定に保ちながら、アンモニア性窒素濃度を2倍に増加させて、硝化反応や硝化菌の増大が、従属栄養菌の基質除去活性へどのように影響を及ぼすか検討するものである。

また、生物膜による基質除去活性を比較評価するために、各流入条件期間の終了時点において、生物膜に

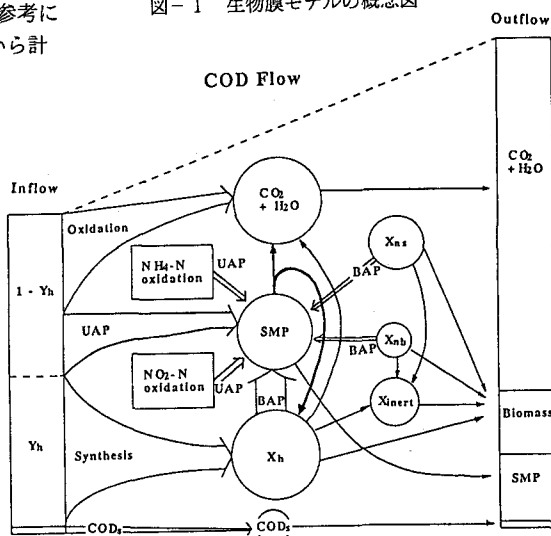


図-2 SMPを考慮したCOD収支図

UAP: 基質利用に由来するSMP, BAP: 死滅などに由来するSMP
Xh: 従属栄養菌, Xns: アンモニア酸化菌, Xnb: 亜硝酸酸化菌

2～3時間¹⁴Cを含む条件でPhase Iと同じ流入水を供給して、カラム流下方向の基質除去分布を調べている。

表-1 Rittmann & Brunner (1984)による生物膜実験の条件

Reactor characteristics	Diameter of packed bead, D_p	0.3 cm			
	Fluid velocity in pores, v	1.06 cm min ⁻¹			
	Porosity, ϵ	0.4			
	Specific area, a ($= 6(1-\epsilon)D_p$)	12 cm ⁻¹			
	Chilton and Colburn j factor J_D	function of Re number *			
	Diffusion layer thickness, L_D ($= D_p/[J_D \cdot Re \cdot Sc^{1/3}]$)	160 μ m			
	Overall oxygen transfer coefficient, $K_L a$	0 day ⁻¹			
Operational Conditions	Phase	I	II	III-1	III-2
	Duration [days]	28	138	52	21
	Influent CODs [mg/l]	3.2	0.32	0.032	0.032
	Influent NH ₄ -N [mg/l]	0.445	0.445	0.445	0.89

*: $J_D = (1.09 Re^{-0.31})/\epsilon$ in the range $0.0016 < Re < 55$, $165 < Sc < 70600$, and $0.35 < \epsilon < 0.75$

3.2 流入濃度低下期間における基質除去活性の変化

図-3と図-4に、各期間でのカラム流下方向の基質除去分布を示した。Phase I、Phase II、Phase IIIを比べると、流入濃度の低下に対応して基質除去活性が低下しており、従属栄養菌量を反映する生物膜の基質除去活性が低下していることがわかる。しかも、上述のように0.032 mgCOD/lという非常に低い流入条件でも有機物(ガラクトース)除去活性が依然として保持されており、50日以上ほとんど有機物が供給されない条件でも従属栄養菌が生き延びている。

さらに、流入アンモニア性窒素濃度を变化させたPhase IIでは、流入濃度が高いPhase III-2で、有機物除去活性が増加していることが興味深い。本モデル予測は図中に実線および波線で示したが、それらは実験結果を適切に再現できている。これは、流入有機物濃度が非常に低い条件では、従属栄養菌の増殖や保持量において、無機物で増殖する硝化菌からの有機物の供給が重要な役割を持つことを示唆している。

図-5に、実験値、本モデル予測値、硝化菌によるSMPの動力学を無視した計算結果の3ケースについて示した。硝化菌と従属栄養菌とのSMPのやり取りを無視すると、Phase IIIのように低い流入有機物濃度では生物膜は50日間に消失すると予測され、まったく除去活性はなくなり実験値を再現できない。同様に、流入アンモニア性窒素濃度増加に対応する除去活性の増大も再現は不可能であった。3ケースの比較から、本モデルは、アンモニア性窒素濃度に比べて有機物濃度が比較的低い流入水を受け入れる生物膜について、その基質除去活性を評価、検討するのに有用であることがわかった。

3.3 従属栄養菌と硝化菌バイオマス量予測

図-6に、Phase IIとPhase IIIにおける微生物保持量変化のモデル予測を示した。流入有機物濃度の低下に対応して従属栄養菌が減少し、一方で従属栄養菌の合成に必要なアンモニア性窒素が減少するため、硝化菌保持量が

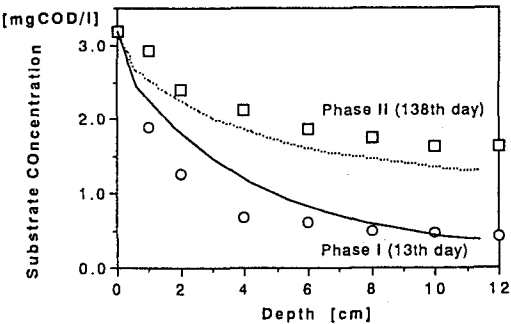


図-3 Phase IとIIにおける基質除去分布

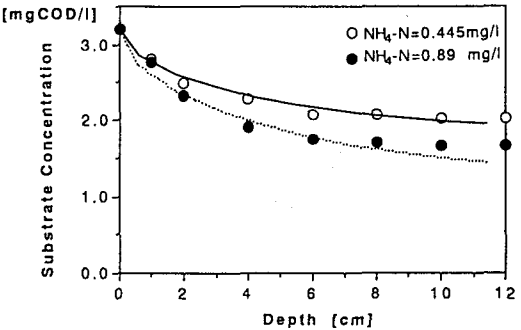


図-4 Phase III-1とIII-2における基質除去分布

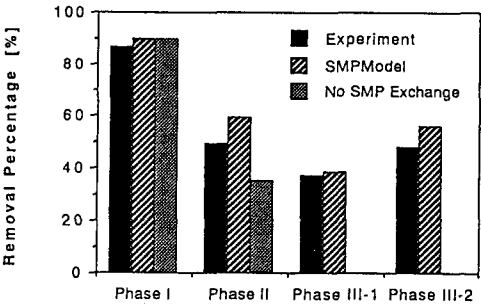


図-5 基質除去率の実験値とモデル予測値の比較

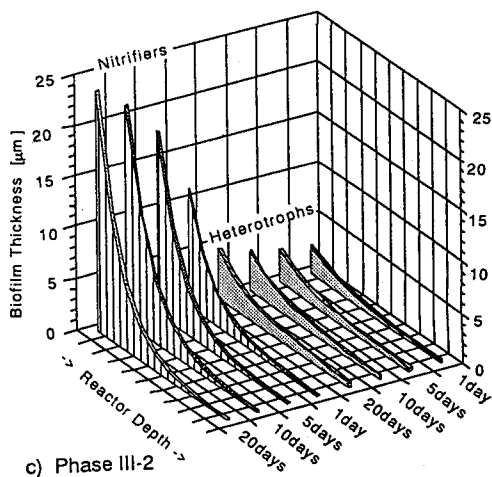
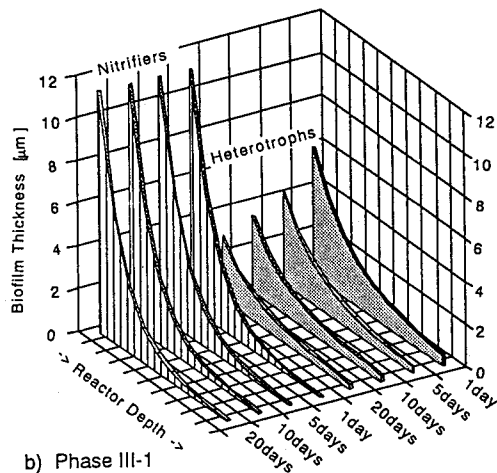
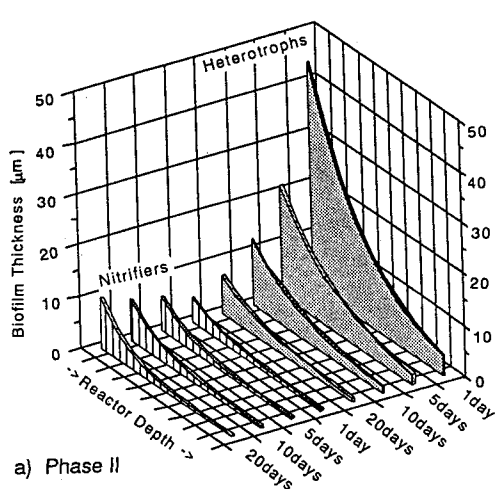


図-6 生物膜内バイオマス保持量の予測結果

増加する。0.32から0.032mgCOD/lへの減少では、硝化に振り分けられるアンモニア性窒素はさほど変化しないため硝化菌量は変化しないものの、従属栄養菌はさらに減少する。最後に、流入アンモニア性窒素の増加により、硝化菌が増加する一方でさきほどまで競合関係にあった従属栄養菌も硝化菌からの基質供給の恩恵を受けて徐々に増えている。

一般に混合培養系の生物膜内の生物量の変化を実験で測定することは非常に困難であり、このようにモデルにより推測できることは、処理プロセスの運転管理を行う上で有益であると考えられる。今後、これらのモデル予測の妥当性を評価するための実験データを必要とするが、現段階では少なくとも基質除去活性を検討、評価するための貴重な生物量情報を提供している。

4. まとめ

Rittmann & Brunnerの実験で得られていた低濃度基質条件での生物膜の基質除去活性の状況を、硝化菌のSMP動力学も考慮した生物膜モデルを用いて再現することが可能であった。そのことより、アンモニア性窒素濃度に比べて有機物濃度が比較的低い場合には、生物膜に硝化菌が相対的に多く保持され、従属栄養菌への基質供給の役割を担っている可能性が示唆された。例えば、水道原水の生物ろ過硝化プロセスや、2次処理水の生物膜硝化プロセスなどを評価したり、これらのプロセスにおける生物保持量などの検討材料を抽出できると思われる。

<参考文献>

- 1) B.E. Rittmann and C.W. Brunner (1994) The Nonsteady-state Biofilm Process for Advanced Organic Removal, *Journal WPCF*, 56, p874-880
- 2) B.E. Rittmann and P.L. McCarty (1980) A Model of Steady-state Biofilm Kinetics, *Biotech. Bioeng.*, 22, p2343-2357
- 3) 古米弘明 (1992) 簡易生物膜モデルによる生物膜の硝化活性の評価 土木学会第47回年講 II-363 p776-777
- 4) H. Furumai and B.E. Rittmann (1993) Evaluation on Multiple-Species Biofilm and Floc Processes Using a Simplified Aggregate Model. *Proc. of 2nd Int. Spec. Conf. on Biofilm Reactors at Paris* . p527-534
- 5) H. Furumai and B.E. Rittmann (1992) Advanced Modeling of Mixed Populations of Heterotrophs and Nitrifiers Considering the Formation and Exchange of Soluble Microbial Products. *Wat. Sci & Tech.* 26, No.3-4, p493-502
- 6) B.E. Rittmann (1982) The effect of Shear Stress on Biofilm Loss Rate, *Biotech. Bioeng.* 24, p501-506